

リモートセンシング画像処理基本ソフトウェアの開発？ 広域衛星画像の地理的変換

著者	矢崎 忍, 建石 隆太郎
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	43
ページ	223-246
発行年	1989-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000990

リモートセンシング画像処理基本ソフトウェアの開発

I. 広域衛星画像の地理的変換

矢崎 忍*・建石隆太郎**

国立防災科学技術センター

Development of Fundamental Softwares in Remote Sensing Image Processing

I. Geographical Transformation of Wide View Satellite Image

By

Shinobu YAZAKI

National Reserch Center for Disaster Prevention, Japan

Ryutaro TATEISHI

Chiba University

Abstract

As one of the series of development program of fundamental softwares of remote sensing data proccesing, correspondence between satellite image and geographical location is dealt with. The polynominal formula of transformation based on GCP data that are valid for LANDSAT image is not sufficient for wide view satellite images such as MOS-1 VTIR or NOAA AVHRR.

For those images, formula based on the map projection is neccesary. In this report.

- 1) Composition of transformation formula between image coordinate and geographical coordinate and evaluation of coeficients in the formula.
- 2) Superposion of geographical map grid on satellite image.
- 3) Transformation of one satellite image to another image coordinate of different projection.

are given for images of Mercator and LCC projection.

And as the unified projection coordinate for resulting image, the square coordinate system is proposed.

1. はじめに

1987年より日本の人工衛星 MOS-1 (Marine Observation Satellite-1) の受信

*第4研究部, 計測研究室

**千葉大学

が始まり、当センターにおいても解析が始まった。MOS-1は3つの地上撮像センサーMESSR (Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer), VTIR (Visible and Thermal Infrared Radiometer) およびMSR (Microwave Scanning Radiometer) を搭載している。このうちMESSRは可視、近赤外の高分解能、狭域の放射計で仕様はLANDSATに近い。VTIRは可視～熱赤外の中分解能、広域の放射計で海面・地表・雲頂温度分布の測定を目的にしている。またMSRはマイクロ波の低分解能、広域の放射計で大気中の水分量や雪、氷の分布などの測定を目的にしている。一方、既に運用されているアメリカの気象衛星NOAAの画像は、その観測波長等の仕様がMOS-1/VTIRと一部共通しており、VTIRと相互補完的に利用できる。広域の気象、気候変動の予測等、防災分野におけるこれらのデータの利用が期待される。

リモートセンシングの分野で、当センターはこれまでLANDSATのMSSやTM、あるいはSPOTの画像を用いて、おもに陸域を対象に災害状況の検出や災害に関連した環境の調査を行ってきた。これらの衛星画像はおもに可視、近赤外の比較的狭い範囲(数10km～100km)の画像であった。これに対してMOS-1/VTIR, MSRやNOAA/AVHRRは数100km～数1000kmにおよぶ広い範囲の画像であり、画像と地上位置の対応において従来のLANDSAT等と異なる手法を要する。

本報告は、人工衛星リモートセンシングにおける基本的ソフトウェアの開発の一環として、MOS-1 VTIR, MSR および NOAAを対象に実施した広域画像の地上位置との対応および幾何学的変換について述べたものである。

2. 広域衛星画像と地図投影

衛星画像を扱う場合画像上の各ピクセルと地上における位置の対応は最も基本である。衛星画像とそれに対応する地球上の位置の関係を示したものが図1である。LANDSATやMOS-1 MESSR などにより陸域の地表を解析対象とする場合、通常良く晴れた日の雲の少ない画像を扱うので画像上にGCP (ground control point) を容易にとることができる。さらにこれらの場合、一度に解析する領域の大きさは高々100km×100km程度であるので地球の曲率の影響は小さく、経度、緯度と画像座標とはGCPデータから最小自乗法によって係数を決定した1次または低次の変換式により精度よく変換できる。

これに対してMOS-1/VTIR, MSRやNOAAなどの広域の画像の場合、地表ばかりではなく海面や雲も解析の対象にするので必ずしもつねにGCPをとることができるとは限らない。また、よく晴れた画像で陸域にGCPをとることができても、この場合地球の曲率が無視できないので変換式は高次になる。これに対して陸域の範囲は全画像においては片寄っているので、GCPデータのみから画像全体で有効な変換式を構成することは困難

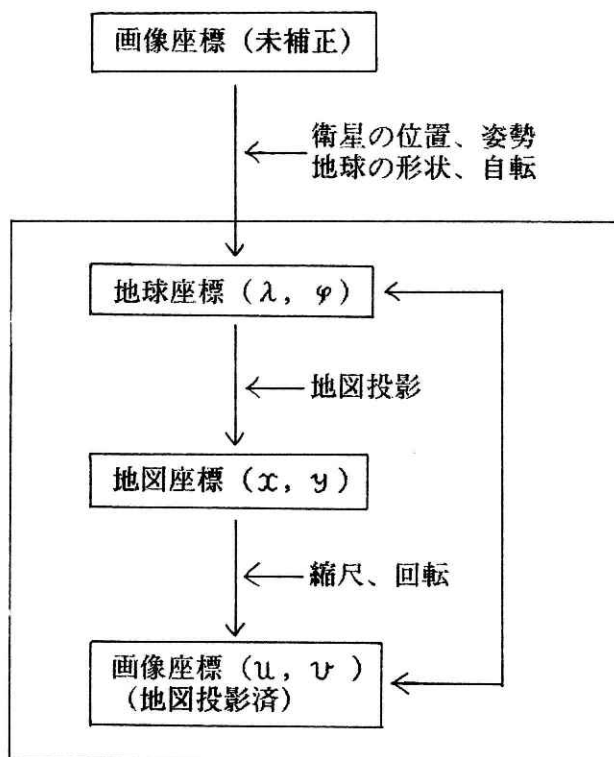


図1 衛星画像と地球上の位置との関係

Fig. Fig. 1 Transformation process from satellite image to geographical coordinate

である。また MSR の画像では分解能が低くもともと GCP をとることができない。

したがって、これらの画像に対しては GCP を用いない方法、すなわち衛星と地球の位置関係のデータから原画像の各ピクセルに対応する地上位置を計算する方法によらなければならない。我々が利用できる衛星画像には地図投影のなされていない原画像と規定の地図上に投影された画像があるが、本稿では地図投影された画像におけるピクセルと地上位置の対応、すなわち図1の枠で囲んだ部分についてのみ述べる。

地図投影には多くの図法があるが、ここでは MOS-1 で用いられている LCC 図法 (Lambert Conformal Conic, ランベルト正軸円錐図法) と MOS-1 および NOAA で用いられているメルカトル図法をとりあげ、これらに対して

- (1) 地球座標から画像座標への変換および逆変換
- (2) 衛星画像への等緯度線、等経度線および海岸線の書き入れ
- (3) 投影法の異なる衛星画像の相互の変換および任意の地図上への変換

を実施した。

3. 地球座標と画像座標との変換

地上の位置は経度と緯度で表わせるが、ここではこれを地球座標と呼んで (λ, φ) で表わすことにする $(\lambda, \varphi$ はそれぞれ東、北方向を正とする)。一方、画像上のピクセル位置はピクセル値とライン値で表わせる。ここではこれを画像座標と呼んで (u, v) で表わすことにする。画像座標は画像の左上を原点 $(u = v = 1)$ として右方および下方をそれぞれ正にとる。地上位置と画像上の位置との対応を知るということは、地球座標と画像座標との変換式を求めることに他ならない。

地図投影された画像の場合地球座標から画像座標への変換は図1に示すように地図座標を介して行われる。地図座標というのは投影面上にとった直交座標で (x, y) で表わすことにする。なお、ここでは地球をベッセル回転楕円体と仮定し赤道半径を R で、離心率を e で表わすことにする。

メルカトール図法とLCC図法の地図投影変換式では φ はつねに

$$\tan \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right] \left[\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right]^{\frac{e}{2}} \quad (1)$$

または

$$\tan \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right] \left[\frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \right]^{\frac{e}{2}} \quad (2)$$

という形で現れる。そこで簡単のため(1)を $f(\varphi)$ で表わすことにする(このとき(2)は $1/f(\varphi)$ で表わされる)。すなわち、

$$\begin{aligned} f(\varphi) &\equiv \tan \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right] \left[\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right]^{\frac{e}{2}} \\ &= 1 / \left\{ \tan \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right] \left[\frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \right]^{\frac{e}{2}} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$f(\varphi)$ の逆関数 $f^{-1}(t)$ も現れるがこれは解析的には表わせない($f^{-1}(t)$ については付録を参照)。

以下に、メルカトール図法およびLCC図法についてそれぞれの変換式を示す。

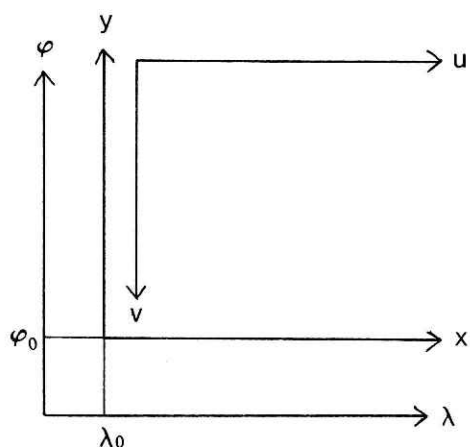


図2 メルカートル図法における各座標間の関係
Fig. 2 Relation of three coordinate systems on the Mercator projection plane

3.1 メルカートル図法

経緯度 (λ_0, φ_0) の点を地図座標原点 $(x = y = 0)$ にとり緯線に沿って東向きに x 軸を、経線に沿って北向きに y 軸をとる (図2)。このとき (λ, φ) と (x, y) の関係はメルカートル図法の地図投影法の公式によって

$$\left. \begin{aligned} x &= R (\lambda - \lambda_0) \\ y &= R \{ \ln f(\varphi) - \ln f(\varphi_0) \} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

で与えられる。

メルカートル図法の場合通常、画像座標を経緯線に沿ってとるので、ここでもそうにとる (図2)。このとき (x, y) から (u, v) への変換は

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + \frac{x}{d} \\ v &= v_0 - \frac{y}{d} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

で表わされる。ここで (u_0, v_0) は地図座標原点 $(x = y = 0)$ の画像座標、 d は $\varphi = 0$ (赤道) におけるピクセルの大きさである (ピクセルは正方形とする)。

(4) と (5) から x, y を消去して

$$\left. \begin{aligned} u &= U + \frac{\lambda}{D} \\ v &= V - \frac{1}{D} \ln f(\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

また、これを λ, φ について解いて

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= D(u - U) \\ \varphi &= f^{-1} [\exp \{-D(v - V)\}] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が得られる。ここに

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{d}{R} \\ U &= u_0 - \frac{\lambda_0}{D} \\ V &= v_0 + \frac{1}{D} \ln f(\varphi_0) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

である。これらの変換式からわかるように、この場合の地球座標と画像座標との変換のパラメーターは3つである。

NOAA AVHRR, 87. 6. 17モードS画像の例

この場合地図投影のパラメーターとして

$\lambda_1 = 135.0$ (°E) : 画像原点 ($u = v = 1$) の経度

$\varphi_1 = 44.0$ (°N) : " 緯度

$d = 3.0$ (km) : 赤道におけるピクセルサイズ

が与えられている。これから (8) により

$$D = 0.0004704$$

が得られ、(6) に $(\lambda, \varphi) = (\lambda_1, \varphi_1)$, $(u, v) = (1, 1)$ を代入することにより

$$U = -5007.80$$

$$V = 1812.74$$

が得られる。

3.2 LCC図法

ここでは MOS-1 で用いられている2基線正角円錐図法について述べる。これは軸が地軸と一致し2つの緯度 (これらを φ_1, φ_2 ($\varphi_1 < \varphi_2$) とする) で地球と交わる円錐面に投影する図法である。

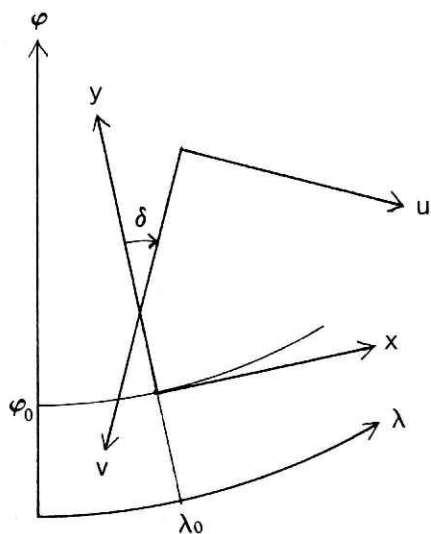


図3 LCC図法における各座標間の関係
Fig.3 Relation of three coordinate systems on the LCC projection plane

正軸図法であるから、経線は投影面上で常に直線になる。そこで地図座標として経緯度 (λ_0, φ_0) の点を原点 $(x = y = 0)$ とし経線に沿って北向きに y 軸を、 y 軸に直交して東向きに x 軸をとることにする (図3)。このとき (λ, φ) と (x, y) の関係はLCC図法の地図投影法の公式によって

$$\left. \begin{aligned} x &= \kappa \{ f(\varphi) \}^{-\mu} \sin \mu (\lambda - \lambda_0) \\ y &= \kappa [\{ f(\varphi_0) \}^{-\mu} - \{ f(\varphi) \}^{-\mu} \cos \mu (\lambda - \lambda_0)] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

で与えられる。ここで μ, κ は

$$\mu = \ln \left\{ \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \left[\frac{1 - e^2 \sin^2 \varphi_2}{1 - e^2 \sin^2 \varphi_1} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} / \ln \left[\frac{f(\varphi_2)}{f(\varphi_1)} \right] \quad (10)$$

$$\kappa = \frac{R \cos \varphi_1 \{ f(\varphi_1) \}^{\mu}}{\mu \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_1}}$$

で定義される定数である。

地図投影画像はその定義から投影面上の像を形を変えずに適当に縮尺したものであるから、この変換は原点移動、縮小および回転によって表わされる。すなわち

$$u = u_0 + \frac{1}{d} (x \cos \delta - y \sin \delta) \quad (11)$$

$$v = v_0 - \frac{1}{d} (x \sin \delta + y \cos \delta)$$

ここで (u_0, v_0) は地図座標原点 $(x = y = 0)$ の画像座標、 d は基準緯度 $(\varphi = \varphi_1, \varphi = \varphi_2)$ におけるピクセルのサイズ、 δ は v 軸の y 軸に対する傾き (y 軸に対して $-v$ 軸が時計回りの向きのとき正とする) である (図3)。

(9) と (11) から x, y を消去して

$$\left. \begin{aligned} u &= U + \frac{1}{D} \{ f(\varphi) \}^{-\mu} \sin(\mu \lambda + \Delta) \\ v &= V + \frac{1}{D} \{ f(\varphi) \}^{-\mu} \cos(\mu \lambda + \Delta) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

また、これを λ, φ について解いて

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{\mu} \left[\arctan \frac{u - U}{v - V} - \Delta \right] \\ \varphi &= f^{-1} \left\{ \left[D^2 ((u - U)^2 + (v - V)^2) \right]^{-\frac{1}{2\mu}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

が得られる。ここで

$$\left. \begin{aligned}
 D &= \frac{d}{\chi} \\
 U &= u_0 - \frac{1}{D} \{ f(\varphi_0) \}^{-\mu} \sin \delta \\
 V &= v_0 - \frac{1}{D} \{ f(\varphi_0) \}^{-\mu} \cos \delta \\
 \Delta &= \delta - \mu \lambda_0
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

である。したがって、この場合地球座標と画像座標との変換を規定するパラメーターは U , V , D , Δ および μ の5つである。

V T I R, 87. 6. 17画像の例

この場合変換パラメーターを求める方法はいろいろあるが、ここではそのうちの1つを示す。用いるデータは

$\varphi_1 = 20$ (°)	:	基準緯度 1
$\varphi_2 = 50$ (°)	:	" 2
$\lambda_0 = 139.35$ (°E)	:	地図座標原点経度
$\varphi_0 = 35.98$ (°N)	:	" 緯度
$d = 0.909$ (km)	:	ピクセルサイズ
$\delta = 16.00$ (°)	:	画像軸の傾き
$x_w = -63.160164$ (km)	:	WRSセンターの x 座標
$y_w = 34.636581$ (km)	:	" y "
$u_w = 1787.73$:	" u "
$v_w = 2132.99$:	" v "

である。まず φ_1 , φ_2 から (10) により

$$\begin{aligned}
 \mu &= 0.580483 \\
 \chi &= 12684.6 \text{ (km)}
 \end{aligned}$$

が得られる。つぎに (11) において d , δ が与えられているので、1つの点の地図座標と画

像座標があれば u_0 , v_0 が求まるが, このような点として WRS センターの値が利用できる. すなわち (11) に $(x, y) = (x_w, y_w)$, $(u, v) = (u_w, v_w)$ を代入して

$$u_0 = 1865.0$$

$$v_0 = 2150.5$$

が求まる. 最後に, (14) により

$$D = 7.1662 * 10^{-5}$$

$$U = -742.1$$

$$V = -6941.7$$

$$A = -64.89 (^{\circ})$$

が得られる. u_0 , v_0 , d , δ はここで述べたやりかたの他に, チックマークデータなどから最小自乗法により求めることもできる (この場合は地図座標原点は任意である).

4. 衛星画像への等緯度線, 等経度線および海岸線の書き入れ

VTIR や NOAA の画像範囲のような広域でみると平均的に地表の 6~8 割は雲に覆われている. 特に陸地付近は雲が出やすく海岸線がはっきり見える画像はむしろ少ない. したがってこれらの画像では目視によって地上位置との対応をつけるのは容易ではない. このとき画像上に海岸線や経緯線を重ね合わせると, この対応は容易になる.

等経度線, 等緯度線および海岸線を経度, 緯度で表わしたデータとして用意しておけば, 3. で求めたような経度, 緯度から画像座標への変換式により, 任意の図法により地図投影された画像上に重ねて描くことができる.

図4~図6にそれぞれ VTIR, MSR および NOAA の画像に経緯線と海岸線を重ね合わせたものを示す.

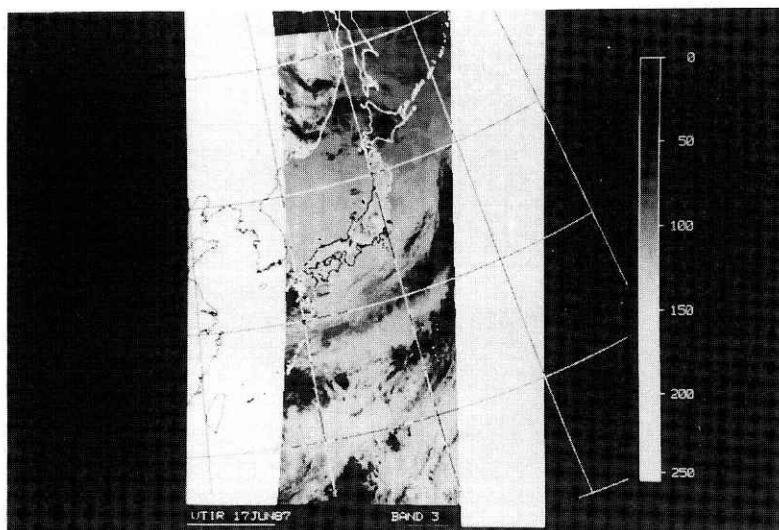


図4 MOS-1 VTIR 画像（LCC図法）と地図・経緯線との重ね合わせ

Fig.4 VTIR image and geographical map and grid superposition (the LCC projection)

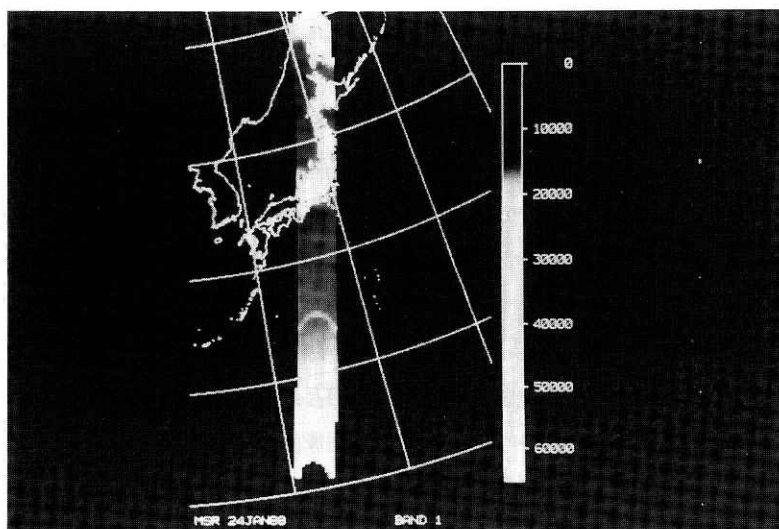


図5 MOS-1 MSR 画像（LCC図法）と地図・経緯線との重ね合わせ

Fig.5 MSR image and geographical map and grid superposition (the LCC projection)

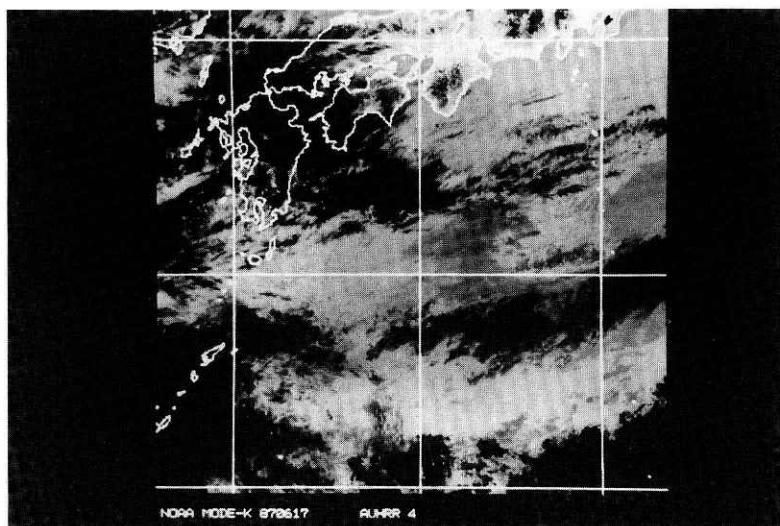


図6 NOAA AVHRR 画像（メルカトル図法）と地図・経緯線との重ね合わせ
Fig.6 NOAA image and geographical map and grid superposition (the Mercator projection)

5. 衛星画像の相互の交換

衛星画像を画像座標系の異なる別の衛星画像の上に変換して2つの画像を幾何学的に重ね合わせることはいろいろな場合に必要になる。1つには同種の画像を比較するためである。例えばVTIRとVTIR,あるいはVTIRとNOAA AVHRRの観測日時の違う2つの画像をラジオメトリック特性を一致させた後,差をとることにより経時変化を抽出することができる。もう1つは,同一の衛星の異なるセンサーによる2つの画像を重ね合わせることで1つの多バンドデータとして利用するためである。MOS-1のVTIRとMSRは同時に観測を行い,それぞれ4つのバンドをもつが,これを重ね合わせることで共通する部分では8バンドのデータとして利用することができる。VTIRはおもに温度情報を,MSRはおもに大気中の水分量の情報を持つので相互に補正情報として利用できる。

2つの画像を重ね合わせるということは2つの画像座標間の変換を求めるということである。それぞれの画像座標と地球座標の変換が求められていれば,画像座標間の変換は一方の画像座標を地球座標に変換してそれを他方の画像座標に変換することにより得られる。すなわち,2つの画像A,Bの画像座標をそれぞれ (u_A, v_A) , (u_B, v_B) とすると

$$(u_A, v_A) \rightarrow (\lambda, \varphi) \rightarrow (u_B, v_B) \quad (*)$$

と表わせる。

画像変換を行なうには各画素毎にこれらの計算をしなければならないので、無駄な計算はできるだけ省いて計算量が少なくなるようにしておくことは有用である。そのためには(*)の2つの変換式から λ , φ を消去して直接 u_A , v_A から u_B , v_B への変換式を求めておけばよい。ここでは特に利用度の高い、メルカトルとLCC, およびLCCどうしについて画像座標間の変換式を求めておく。

5.1 メルカトル画像とLCC画像との変換

メルカトル画像の画像座標を (u_M, v_M) , LCC画像の画像座標を (u_L, v_L) とすると, (u_M, v_M) と (u_L, v_L) との変換は(7), (12)から λ , φ を消去して

$$\left. \begin{aligned} u_L &= U_1 + \frac{1}{D_1} \exp(\mu_1 v_M) \sin(\mu_1 u_M + \Delta_1) \\ v_L &= V_1 + \frac{1}{D_1} \exp(\mu_1 v_M) \cos(\mu_1 u_M + \Delta_1) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

およびこれを u_M , v_M について解いて

$$\left. \begin{aligned} u_M &= \frac{1}{\mu_1} \left\{ \arctan \left[\frac{u_L - U_1}{v_L - V_1} \right] - \Delta_1 \right\} \\ v_M &= \frac{1}{2\mu_1} \ln [D_1^2 \{ (u_L - U_1)^2 + (v_L - V_1)^2 \}] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

と得られる。ここで

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \mu_L D_M \\ D_1 &= D_L \exp(\mu_1 V_M) \\ \Delta_1 &= \Delta_L - \mu_1 V_M \\ U_1 &= U_L \\ V_1 &= V_L \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

である。(17)でサフィックスのMおよびLはそれぞれ(8),(14)で与えられたメルカトールとLCCの変換のパラメータを示す。

NOAA AVHRRのメルカトール投影画像は日本付近を約1500 km (東西) × 1400 km (南北) (画素数 512 × 480) の5つのブロックに分けて提供される。

NOAA, 87. 6. 17とVTIR, 87. 6. 17の重ね合せての例

NOAAとVTIRのパラメータは3.1および3.2で求めているのでこれらを(17)に代入して

$$\mu_1 = 2.7306 * 10^{-4}$$

$$D_1 = 1.1756 * 10^{-4}$$

$$A_1 = 13.46 (^{\circ})$$

$$U_1 = -742.11$$

$$V_1 = -6941.70$$

が得られる。

ここではNOAAをVTIRの上に変換した例を示す。図7はVTIRのバンド3画像を、図8はNOAAチャンネル4画像をそれぞれ温度表示したもので(観測波長は共に10.5~11.5 μm)、図8は図7の約4時間後の画像である。図9にNOAAの温度からVTIRの温度を引いた差の画像を示す。この図で明るいところは4時間の間に温度の上昇したところを、暗いところは温度の下降したところを示している。

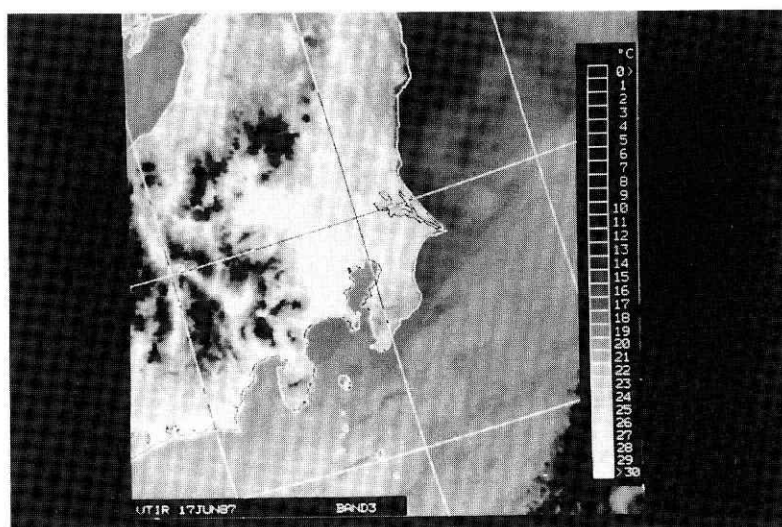


図7 VTIR バンド3 から求められた温度分布 (関東周辺)
(観測日時: 1987.6.17 10:20 (JST) 頃)

Fig.7 Temperature distribution in and around the Kanto area due to brightness of VTIR band-3 at 10:20 (JST), 17. Jun. 1987

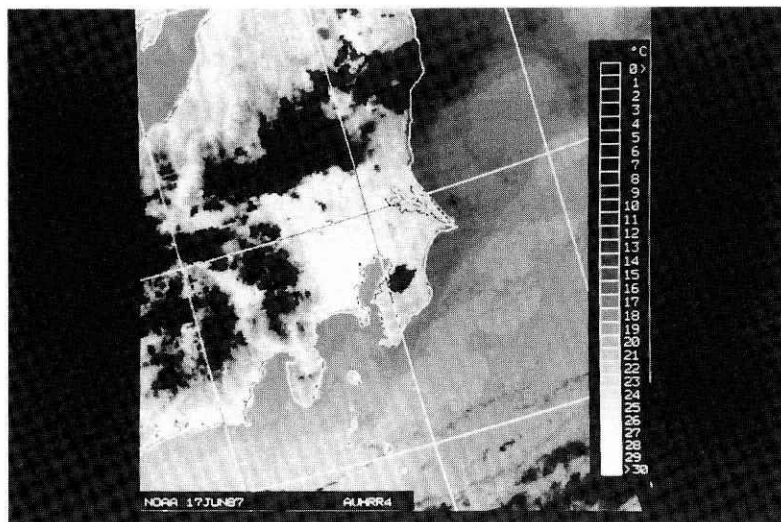


図8 NOAA AVHRR チャンネル 4 から求められた温度分布 (VTIR (図7)) との重ね合わせ
画像 (観測日時: 1987.6.17 14:10 (JST) 頃)

Fig.8 Temperature distribution due to brightness of NOAA channel-4
at 14:10 (JST), 17. Jun. 1987, transformed to the VTIR image coordinate of Fig.7

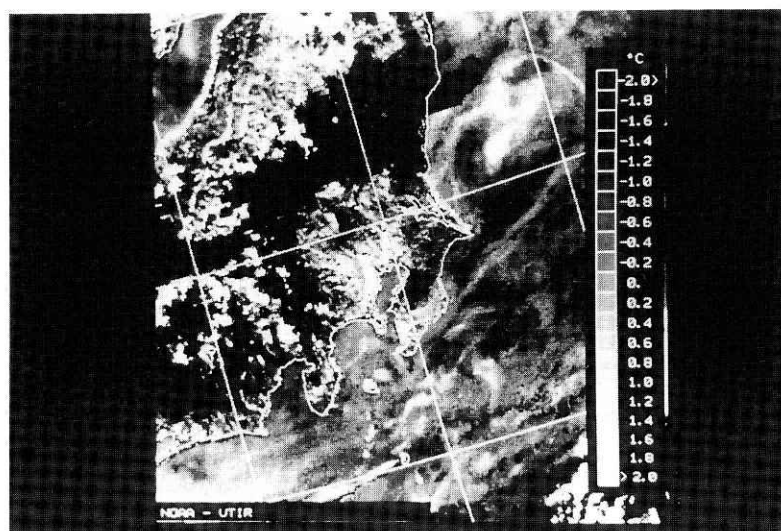


図9 NOAAの温度 (6.17, 14:10) とVTIRの温度 (6.17, 10:20) との差

Fig.9 Temperature difference between the NOAA image of Fig.8
and the VTIR image of Fig.7

5.2 LCCどうしの変換

ここでは2つの基準緯度 (φ_1, φ_2) は共通とする。MOS-1のLCC画像はすべてこの場合に当てはめる。このときは地図投影面が共通であるから画像座標どうしは原点移動、回転および拡大・縮小の関係、すなわちヘルマート変換の関係になる。したがって、2つのLCC画像の画像座標をそれぞれ (u_A, v_A), (u_B, v_B) とするとこの変換は

$$\left. \begin{aligned} u_B &= a u_A + b v_A + c \\ v_B &= -b u_A + a v_A + d \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

および

$$\left. \begin{aligned} u_A &= p u_B + q v_B + r \\ v_A &= -q u_B + p v_B + s \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

で与えられる。ここで係数 a, b, \dots は

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{D_A}{D_B} \cos (\Delta_B - \Delta_A) \\ b &= \frac{D_A}{D_B} \sin (\Delta_B - \Delta_A) \\ c &= U_B - a U_A - b V_A \\ d &= V_B + b U_A - a V_A \\ p &= \frac{D_B}{D_A} \cos (\Delta_A - \Delta_B) \\ q &= \frac{D_B}{D_A} \sin (\Delta_A - \Delta_B) \\ r &= U_A - p U_B - q V_B \\ s &= V_A + q U_B - p V_B \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

で与えられる。(20)でサフィックスの A および B はそれぞれの画像の(14)で与えられるパラメータを示す。

VTIR, 87. 8. 8 と MSR 87. 8. 8 の重ね合せの例

これらの画像の場合 $\varphi_1 = 20 (^\circ)$, $\varphi_2 = 50 (^\circ)$ は共通である。3.2 と同様に VTIR (画像 A とする) および MSR (画像 B とする) のパラメータを求めると

$$D_A = 7.1662 * 10^{-5}$$

$$U_A = -541.75$$

$$V_A = -7365.58$$

$$d_A = -64.89 (^\circ)$$

および

$$D_B = 7.8836 * 10^{-4}$$

$$U_B = -143.64$$

$$V_B = -357.21$$

$$d_B = -64.71 (^\circ)$$

が得られる。これらから (20) により

$$a = .090900$$

$$b = .000279$$

$$c = -92.339$$

$$d = 312.170$$

$$p = 11.00105$$

$$q = -0.03381$$

$$r = 1026.377$$

$$s = -3431.075$$

が得られる。

図10に88年1月24日のVTIR画像（一部）を，図11に図10のVTIR画像と同時に観測されたMSR画像をVTIR画像の上に変換したものを示す。



図10 VTIR バンド 3 画像（1988.1.24，日本全土および周辺）

Fig.10 VTIR band-3 image of 24. Jan. 1988, in and around the Japan islands

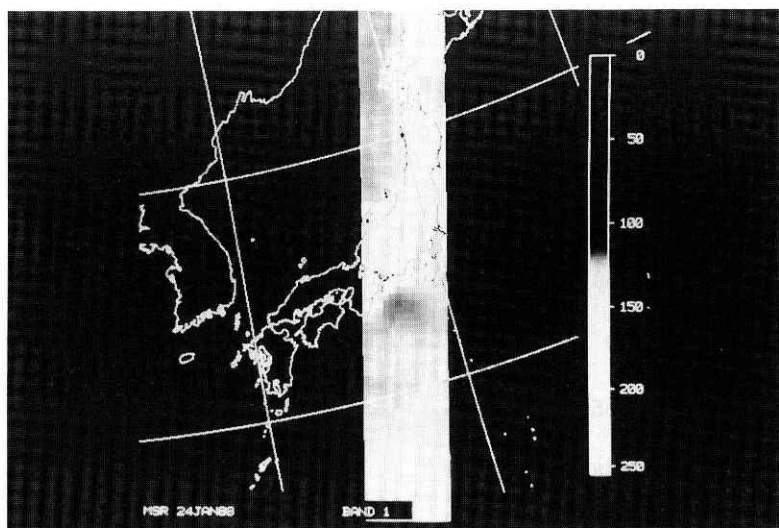


図11 MSR バンド 1 画像（1988.1.24）とVTIR（図10）との重ね合わせ

Fig.11 MSR band-1 image of 24. Jan. 1988 transformed to the VTIR coordinate of Fig.10

5.3 正方形図法への変換

幾何学的に未補正の画像も含めて、いろいろな地図投影法による広域の衛星画像を処理した結果得られた画像（例えば海面温度分布等）をデータファイルとして蓄積していくようなとき、共通の図法に変換しておいたほうが後の利用のために都合がよい。このような共通の図法の要件としては、画像と地上位置の対応が簡単で、広い範囲で均一な表示がなされ、しかも形や面積の歪のあまり大きくない図法が好ましい。まず、画像と地上位置の対応が簡単で広い範囲で均一な表示がなされているという点では円筒図法がよい。円筒図法のうちで例えばメルカトル図法は方位を正しく表わすことを目的にした図法であり、したがって方位は正しく表わされるが高緯度で面積が著しく拡大される欠点がある。また面積を正しく表わす図法である等積図法では高緯度で形が著しく歪む。このようにすべてを正しく表わすことができない以上それぞれ一長一短があるが、ここでは正方形図法をとりあげる。

正方形図法は一定の経緯度差を地図上の正方形に対応させるもので、一定の経緯度差の領域が画像の一つのピクセルに対応するので対応関係がきわめて簡単である。また形や面積の歪みもそれほど大きくはない。

この図法では地球座標と画像座標の変換は簡単に

$$u = \frac{\lambda - \lambda_0}{D} + 1 \quad (21)$$

$$v = \frac{\varphi_0 - \varphi}{D} + 1$$

および

$$\lambda = \lambda_0 + D(u - 1) \quad (22)$$

$$\varphi = \varphi_0 - D(v - 1)$$

で与えられる。ここで λ_0 、 φ_0 は画像座標原点の経度、緯度、 D は経緯度で計ったピクセルの大きさである。

図12に正方形図法による表示例としてVTIRの画像を変換したものを示す。この図では $\lambda_0 = 110^\circ \text{E}$ 、 $\varphi_0 = 60^\circ \text{N}$ 、 $D = 0.1^\circ$ である。

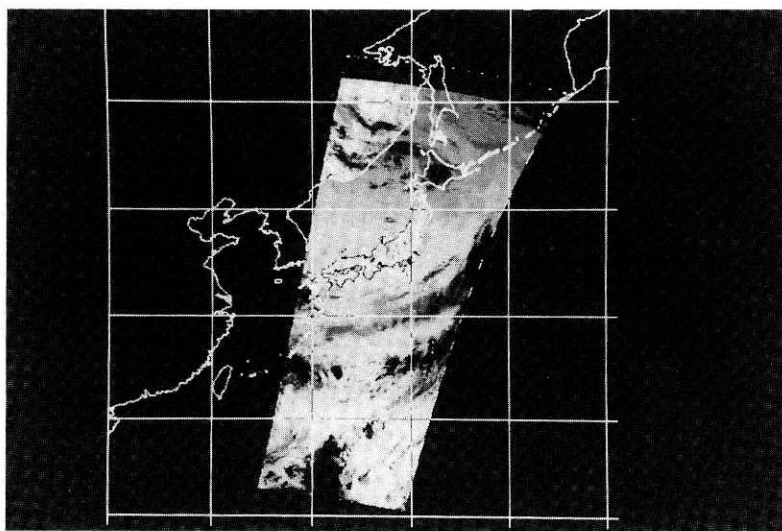


図12 正方形図法による VTIR バンド3 画像 (1987.6.17)

Fig.12 Example of the square map projection applied to the VTIR band-3 image

6. ま と め

MOS-1 およびNOAAで用いられているメルカトル図法とLCC図法に対して、画像座標（ピクセル）と地球座標（経度，緯度）との変換式およびそれに含まれるパラメーターの値の決定のアルゴリズムを求めた。また，その変換式を用いて上記の図法に投影された衛星画像に等経度，等緯度線および海岸線の重ね合わせ，異なる地図投影法による衛星画像間の変換および共通地図座標系としての正方形図法への変換を行った。

これらの手法の開発により MOS-1 およびNOAAの画像を統一的に扱えるようにした。

参 考 文 献

地図投影法の公式は宇宙開発事業団の内部資料より引用した。

(1988年12月19日 原稿受理)

付 録 f^{-1} の計算

$f(\varphi)$ の逆関数 $f^{-1}(t)$ は解析的に explicit な形には表わせないので逐次計算により値を求めなければならない。

$$\varphi = f^{-1}(t) \quad (\text{A } 1)$$

とおくと、定義から

$$t = f(\varphi) = \tan \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right] \left[\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right]^{\frac{e}{2}} \quad (\text{A } 2)$$

これを変形して

$$\varphi = 2 \arctan \left\{ t \left[\frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \right]^{\frac{e}{2}} \right\} - \frac{\pi}{2} \quad (\text{A } 3)$$

となる。この形のままで逐次計算してもよいが、三角関数の計算を多数回行なうことになるので次のようにしたほうが計算時間が少なくてすむ。

$$a = e \sin \varphi \quad (\text{A } 4)$$

$$\theta = \arctan \left\{ t \left[\frac{1 + a}{1 - a} \right]^{\frac{e}{2}} \right\} \quad (\text{A } 5)$$

で a, θ を定義すると (A 3) は

$$\varphi = 2 \theta - \frac{\pi}{2} \quad (\text{A } 6)$$

となる。(A4), (A6) から

$$a = -e \cos 2\theta \quad (\text{A7})$$

となるが, ここで三角関数の公式

$$\cos 2\theta = \frac{1 - \tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta}$$

を使うと (A7) はまた

$$a = e \frac{\tan^2 \theta - 1}{\tan^2 \theta + 1} \quad (\text{A8})$$

と書ける. さらに

$$b = \tan^2 \theta \quad (\text{A9})$$

で b を定義すると, (A8) は

$$a = e \frac{b - 1}{b + 1} \quad (\text{A10})$$

と書ける. 一方, (A5), (A9) から

$$b = t^2 \left[\frac{1 + a}{1 - a} \right] e \quad (\text{A11})$$

が得られる.

(A10), (A11) は a , b に対する連立方程式になっているから, 適当な初期値から始

めて (A10), (A11) を交互に求めていけばよい. 漸化式の形に書けば例えば

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 0 \\ b_i &= t^2 \left[\frac{1 + a_{i-1}}{1 - a_{i-1}} \right] e \\ a_i &= e \frac{b_i - 1}{b_i + 1} \end{aligned} \right\} \quad (A12)$$

となる. これを n 回繰り返して得られる a_n から, (A4) により $\varphi(t)$ の第 n 近似として

$$\varphi_n(t) = \arcsin \left[\frac{a_n}{e} \right] \quad (A13)$$

が求まる.

ここで (A12) の収束性を調べておく必要がある. 収束残差 $\varphi_n(t) - \varphi(t)$ の t の値のすべて定義域 ($0 \leq t < \infty$) に亘る最大値を d_n , すなわち

$$d_n(t) = \max_t |\varphi_n(t) - \varphi(t)| \quad (A14)$$

として, 各 n について d_n を求めると, 表 A1 のようになった. 例えば 2 回の繰り返して収束残差は地上距離にして 80 m 位である. したがって, MOS-1 や NOAA の場合は地上分解能からみて $n=2$ で十分であることが分かる. また, どのような場合にも $n=3$ で十分であることも分かる.

最後に図 A1 に (A12), (A13) を用いて $f^{-1}(t)$ を求める関数サブルーチンの例を示す.

表A1 繰返し回数と収束残差

Table A1. Convergence residuals in terms of number of iteration

n	d_n (単位: 度)	地上距離換算 (概数)
1	2×10^{-1}	20 km
2	8×10^{-4}	80 m
3	4×10^{-6}	40 cm
4	3×10^{-8}	3 mm

```

FUNCTION FINV(T)
PARAMETER E = 0.0816968
PARAMETER N = 2 ( or 3 )
TT = T * T
A = E * ( TT - 1 ) / ( TT + 1 )           = a1
DO 1 I = 2 , N
  B = TT * ( ( 1 + A ) / ( 1 - A ) ) ** E = bi
1  A = E * ( B - 1 ) / ( B + 1 )         = ai
  FINV = ASIN ( A / E )
RETURN
END

```

図A1 $f^{-1}(t)$ を求めるFORTRANサブルーチン

Fig.A 1. A FORTRAN program to compute function $f^{-1}(t)$